

2. SENSORES

1. Sensores y transductores.
2. Clasificación de los sensores.
3. Características generales.
4. Principios de transducción.

Bibliografía:

R. Pallás Areny, Sensores y Acondicionadores de señal, Ed. Marcombo.
J. Fraden, Handbook of Modern Sensors, AIP Press
H.N. Norton, Handbook of Transducers, Ed. Prentice Hall.
S. Middelhoek, S.A. Audet, Silicon Sensors, Ed. Academic Press

1. SENSORES Y TRANSDUCTORES

- **Sensor**: hace referencia al dispositivo que proporciona una *respuesta* (normalmente mediante la generación de una señal eléctrica) *frente a estímulos* o señales físicas o químicas.
- **Transductor**: hace referencia al dispositivo que *convierte una señal de una forma de energía en otra señal de naturaleza diferente*.
 - La conversión puede ser de una señal física o química en una señal eléctrica (**transductor de entrada**) o viceversa (**transductor de salida** o actuador), o incluso puede no involucrar señales eléctricas (por ejemplo, un bimetalo convierte cambios de temperatura en cambios de curvatura del dispositivo).
- Al realizar una medida se toma energía del medio donde se mide, y éste se perturba. Por ello, la energía tomada debe ser mínima y la *señal de salida* (resultado de la transformación de la energía tomada del medio) es *pequeña*.
- El *dominio eléctrico* de las señales de salida permite la utilización de una gran cantidad de *recursos electrónicos* para su tratamiento (Cis amplificadores, filtros, etc.), transmisión o almacenamiento.

* A veces si habla de transductor como el dispositivo que realiza conversiones de energía no-eléctricas y el sensor se refiere al dispositivo que realiza la conversión final a señal eléctrica.

2. CLASIFICACIÓN DE LOS SENSORES

- **Según aporte de energía**
 - Moduladores: precisan una fuente externa de alimentación.
 - Generadores: toman únicamente la energía del medio donde miden.
- **Según la señal de salida**
 - Analógicos: la salida varía de forma continua. Normalmente la información está en la amplitud. Cuando la información está en la frecuencia se denominan “cuasi-digitales”.
 - Digitales: la salida varía en pasos discretos.
- **Según el modo de funcionamiento**
 - Deflexión: la magnitud medida genera un efecto físico (deflexión).
 - Comparación: se intenta mantener nula la deflexión mediante la aplicación de un efecto opuesto al generado por la magnitud medida.
- **Según la relación entrada-salida**: orden cero, 1^{er} orden, 2^o orden
- **Según el principio físico**: resistivo, capacitivo, inductivo, termoeléctrico, piezoeléctrico, ...
- **Según la magnitud media**: temperatura, presión, aceleración, pH ...

3. CARACTERÍSTICAS GENERALES

3.1 Diseño (*design*)

- Magnitud medida
- Características eléctricas
- Características mecánicas

3.2 Prestaciones (*performance*)

- Estáticas
- Dinámicas
- Ambientales

3.3 Fiabilidad (*reliability*)

- Tiempo o ciclos de vida

* *Lectura complementaria: What Transducer Performance Specs Really Mean, R.E. Tasker*

3.1 CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO

3.1.1 Magnitud medida (*measurand*)

- Naturaleza: magnitud que es detectada por el sensor (ej. Presión, aceleración, etc).

A veces, la magnitud medida es usada para calcular otras magnitudes.

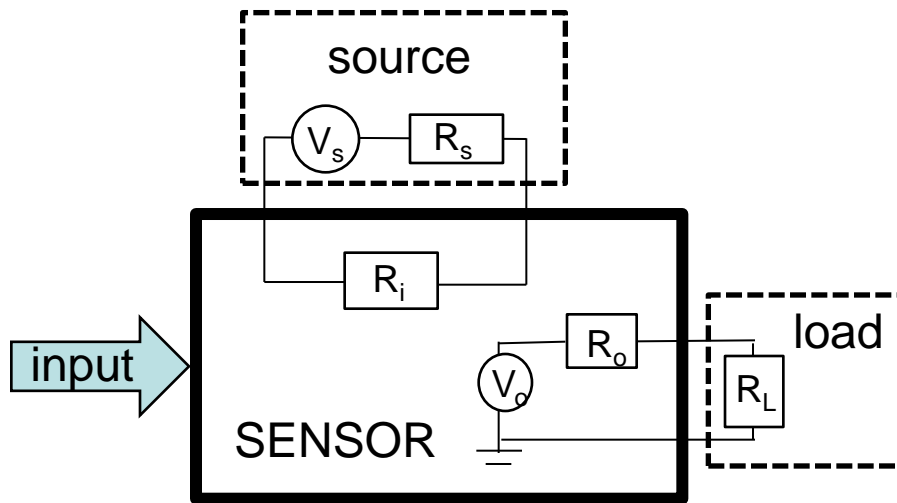
Idealmente el sensor solo responde a una magnitud de entrada (la salida es solo función de una magnitud) pero es frecuente que la salida se vea afectada por otras magnitudes (selectividad a una magnitud).

- Rango (*range*): límites superior e inferior de la magnitud medida.
- Span de entrada (input span) o fondo de escala de entrada (*input full scale FS*): diferencia algebraica entre los límites superior e inferior de la magnitud medida

3.1 CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO

3.1.2 Características eléctricas (*electrical design characteristics*)

Hacen referencia a las interfaces eléctricas del sensor considerado éste como una «caja negra».



3.1 CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO

3.1.2 Características eléctricas (*electrical design characteristics*)

- Salida (*output*): magnitud eléctrica producida por el sensor función de la magnitud medida.

Generalmente la salida es una función continua de la entrada (salida *analógica*) en la que la información va en la *amplitud* del voltaje o la corriente, o en cambios en la resistencia, la capacidad o la inducción magnética. La información puede ir en las variaciones de *frecuencia*, el periodo o la anchura de pulsos. En los sensores tipo *switch* la salida presenta solo dos valores posibles (todo-nada). La salida *digital* presenta incrementos discretos codificados (ej. código binario).
- Puntos finales (*end points*): valores de salida para los límites inferior y superior del rango de entrada del sensor.
- Span de salida (*output span*) o fondo de escala de salida (*output full scale FSO*): diferencia algebraica entre las salidas eléctricas medidas cuando se aplican los valores máximo y mínimo de la magnitud de entrada.

3.1 CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO

3.1.2 Características eléctricas (*electrical design characteristics*)

- Excitación o alimentación (*excitation*): señal eléctrica externa que suministra la potencia necesaria para activar el funcionamiento del sensor.

Generalmente se especifica como un rango de tensión o voltaje. Otras veces se indica la máxima potencia aplicable, limitada para evitar un *autocalentamiento* excesivo. A veces también se indica la frecuencia y la estabilidad de la fuente de alimentación.

Una fuente externa es necesaria en los sensores moduladores pero no en los sensores generadores. Muchos sensores moduladores son *ratiométricos* porque la salida es proporcional a la señal de alimentación. Por ejemplo, el voltaje de salida (caída de tensión en un sensor resistivo) es el doble si se alimenta con una fuente de corriente que proporciona el doble de corriente.

- Impedancia de entrada (*input impedance*): impedancia que presenta el sensor a la fuente de alimentación.

Es importante que haya un buen acoplo con la impedancia de la fuente.

- Impedancia de salida (*output impedance*): impedancia medida en los terminales de salida del sensor.

Es importante que haya un buen acoplo con la impedancia de carga (impedancia de entrada del circuito al que se conecta la salida del sensor).

3.1 CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO

3.1.3 Características mecánicas (*mechanical design characteristics*)

Definen las interfaces físicas del sensor.

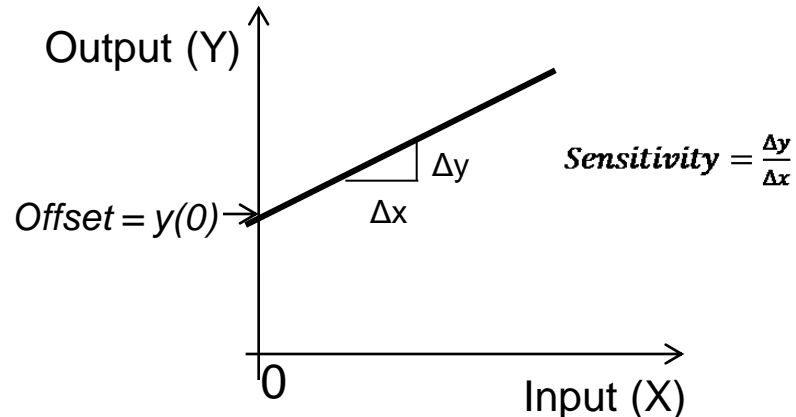
- Peso (*weight*).
- Configuración (*configuration*): normalmente se indica con dibujos esquemáticos todas las dimensiones y las localizaciones de todas las conexiones mecánicas, eléctricas y de fluidos, incluyendo cualquier agujero de montaje. Encapsulados o sellados especiales deben especificarse por la norma industrial que cumplen.
- Identificación (*nameplate information*): mediante la nomenclatura apropiada se señalan las características más relevantes del modelo.

3.2 PRESTACIONES

3.2.1 Características estáticas (*static performance characteristics*)

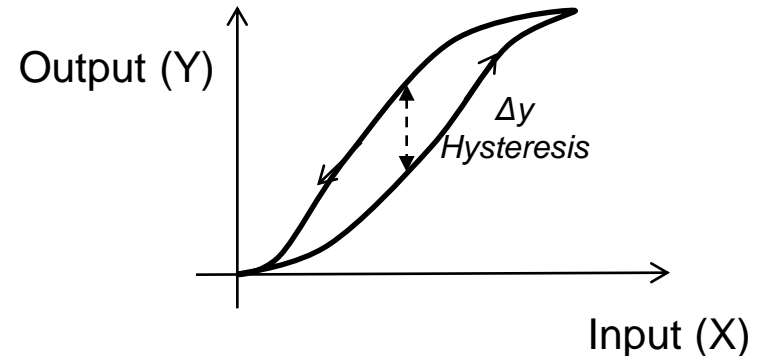
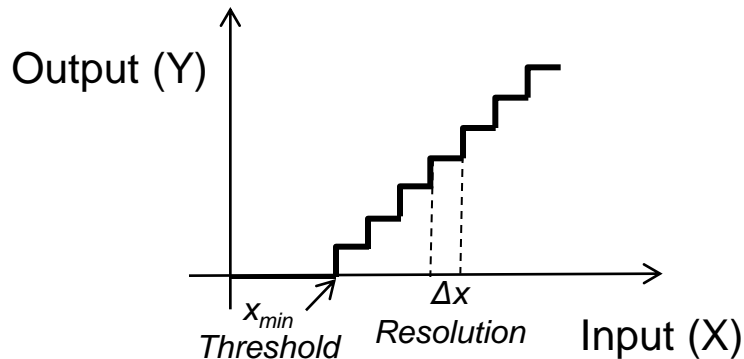
Describen las prestaciones del sensor en condiciones ambientales normales (temperatura $25^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, humedad relativa $< 90\%$, presión barométrica entre 88 y 108 kPa, en ausencia de vibraciones) cuando la entrada cambia muy lentamente.

- Sensibilidad (sensitivity): es la relación entre el cambio en la salida y el cambio en la entrada. Determina la pendiente de la función de transferencia o de la curva de calibración.
- Offset, Zero o null: es el valor de la salida para entrada cero.



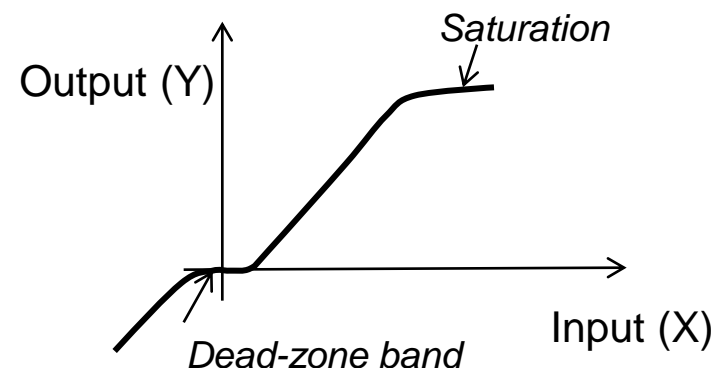
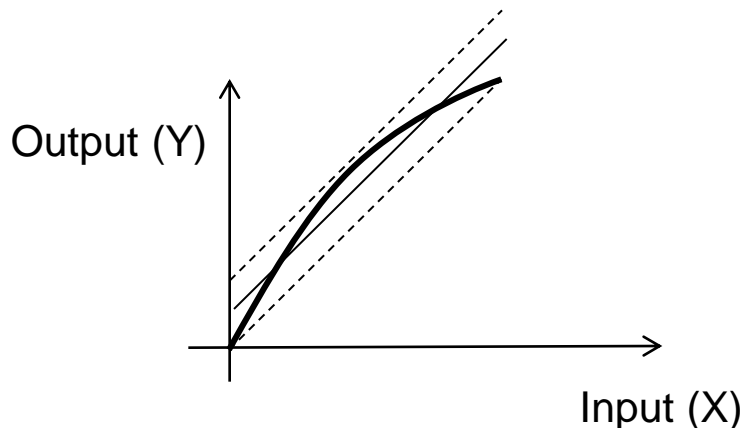
3.2.1 Características estáticas (*static performance characteristics*)

- Resolución (*resolution*): es el mínimo cambio en la entrada que puede ser detectado a la salida.
 - La mayoría de los sensores analógicos tienen una resolución infinitesimal. En los sensores digitales, la resolución es finita y está limitada por el número de bits.
- Umbral (*threshold*): mínimo valor de la entrada que es detectado a la salida.
- Repetitividad (*repeatability*): diferencia en la salida cuando se aplican los mismos valores de entrada y en las mismas condiciones.
 - Reproducibilidad (*reproducibility*): hace referencia a la capacidad de obtener la misma salida cuando se aplican los mismos valores de entrada en «aparentemente» las mismas condiciones pero por diferentes personas o en diferentes laboratorios.
- Histéresis (*hysteresis*): máxima diferencia en la salida cuando los valores de la entrada se aproximan de forma creciente y luego decreciente.



3.2.1 Características estáticas (*static performance characteristics*)

- Linealidad (*linearity*): es la proximidad de la curva de calibración del sensor a una línea recta.
 - Debe siempre indicarse a qué recta nos referimos.
 - Theoretical-slope linearity: línea recta entre los puntos finales teóricos.
 - Terminal linearity: línea recta entre los puntos finales teóricos cuando estos van del 0 al 100% del rango y el fondo de escala de salida.
 - Independent linearity o best straight line: línea recta intermedia entre dos líneas rectas paralelas que envuelven todos los valores de salida en la curva de calibración
 - Least-squares linearity: línea recta obtenida de minimizar el cuadrado de los residuos (desviaciones de la salida real respecto a la línea recta calculada)
 - Point based linearity: línea recta que pasa por un punto determinado
 - La falta de linealidad puede ser debida a la existencia de saturación o zonas muertas.
 - Cuando la curva de calibración es inherentemente no lineal, se habla de conformidad (conformance) respecto a otro tipo de curva matemática.



3.2 PRESTACIONES

3.2.2 Características dinámicas (*dynamic performance characteristics*)

Describen la respuesta del sensor a variaciones de la entrada en el tiempo, en condiciones ambientales normales.

Cuando la relación entrada-salida puede describirse a través de una ecuación diferencial lineal de coeficientes constantes, las características dinámicas pueden estudiarse a través de dicha ecuación (orden del sistema)

- Respuesta en frecuencia (*frequency response*): especifica la respuesta de un sensor ante entradas periódicas (típicamente sinusoidales)
 - Rango de frecuencia en el que para entradas sinusoidales la amplitud de la relación salida/entrada es constante dentro de un determinado margen de error dinámico.
 - Desfase (*phase shift*) a una frecuencia dada: define el retraso, expresado en grados o rad, de la señal de salida respecto a una señal sinusoidal de entrada.
- Respuesta transitoria (*transient response*): hace referencia a la respuesta del sensor ante entradas en salto.
 - Tiempo de respuesta (*response time*): tiempo requerido para que la salida alcance un porcentaje especificado de su valor final (típicamente 95% o 98%)
 - Tiempo de subida (*rise time*): tiempo requerido para que la salida pase de un pequeño porcentaje a un gran porcentaje del valor final (típicamente 10% al 90%)

3.2.2 Características dinámicas (dynamic performance characteristics)

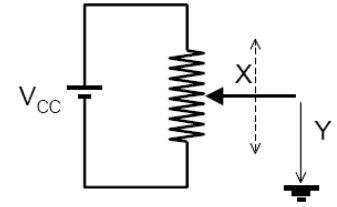
- En un sistema de orden cero, el sensor responde instantáneamente y no es necesario especificar características dinámicas.
- Un sistema de primer orden se caracteriza por f_c o τ (ambos están relacionados)
 - La frecuencia de corte (cutoff frequency) es el parámetro $f_c=1/(2\pi\tau)$ de la función de transferencia. A esta frecuencia el error dinámico es del -30% (la amplitud de la salida se reduce en -3dB o $1/\sqrt{2}$). Para un error dinámico inferior al 5% el rango de frecuencia va dc a $0.1f_c$
 - La constante de tiempo (*time constant*) es el parámetro τ de la función de transferencia. Corresponde a un tiempo de respuesta del 63%.
- Un sistema de segundo orden se caracteriza por,
 - El factor de amortiguamiento (*damping ratio*) es el parámetro ζ de la función de transferencia y es la relación entre el amortiguamiento real y el amortiguamiento crítico del sistema. Cuando la respuesta del sensor lo más rápida posible sin overshoot, la respuesta está críticamente amortiguada (*critically damped*). Cuando hay overshoot la respuesta es subamortiguada (*underdamped*) y cuando es más lenta es sobreamortiguada (*overdamped*).
 - La Frecuencia natural (natural frequency) es el parámetro ω_n de la función de transferencia. A esta frecuencia el desfase entre la salida y la entrada es de -90° . En un sistema subamortiguado con $\zeta < 0.7$, existe una frecuencia de resonancia (resonant frequency) en la que la amplitud de salida de señales sinusoidales es máxima. Generalmente el rango de frecuencias de funcionamiento se selecciona suficientemente más bajo (al menos un 60%) de la frecuencia de resonancia, aunque algunos sensores tienen su punto de funcionamiento en la frecuencia de resonancia (mucha sensibilidad en un estrecho ancho de banda).
 - En respuestas transitorias oscilatorias (subamortiguadas), generalmente se habla de tiempo de establecimiento (*settling time*) en el que la amplitud de la oscilación es suficientemente pequeña, en lugar de tiempo de respuesta.

SISTEMAS DE ORDEN ZERO

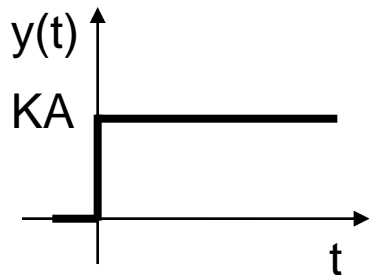
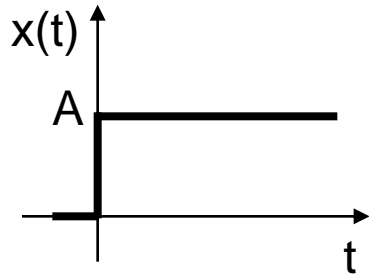
La entrada y la salida están relacionadas por una constante (el sistema no incorpora elementos almacenadores de energía)

$$y(t) = k \cdot x(t) \quad \frac{Y(s)}{X(s)} = k$$

Ej: potenciómetro

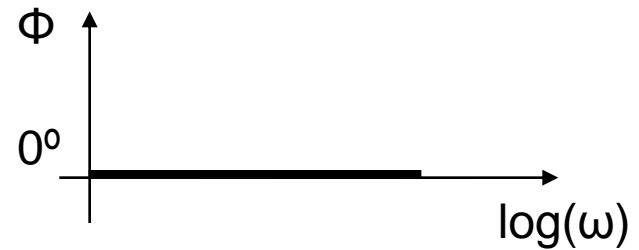
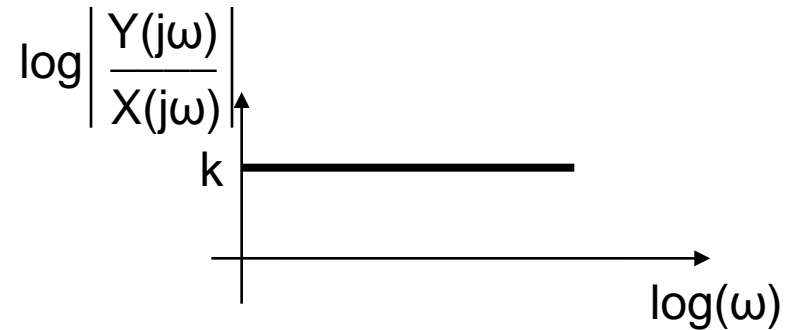


Respuesta a una entrada en salto



No hay retardos

Diagrama de Bode



Ancho de banda infinito, sin desfase

SISTEMAS DE PRIMER ORDEN

La entrada y la salida están relacionadas por una ecuación diferencial de primer orden

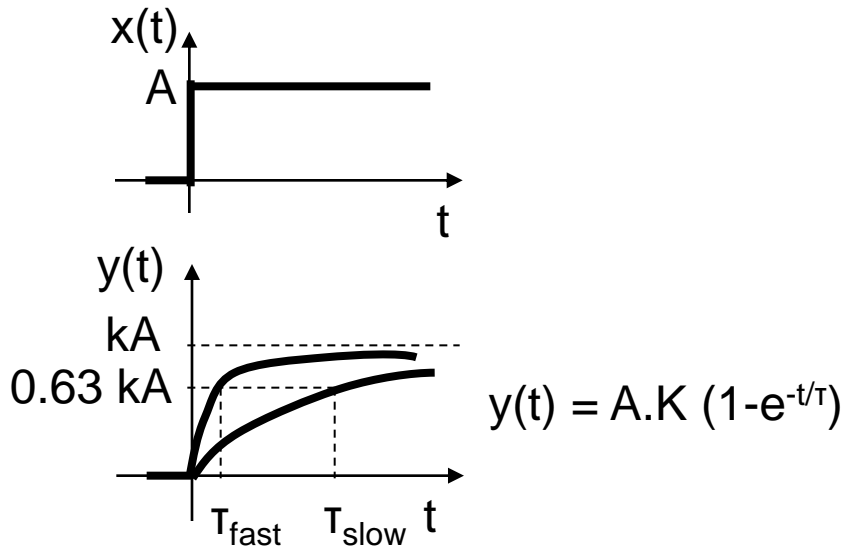
$$a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y(t) = x(t)$$

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{a_1 s + a_0} = \frac{k}{\tau s + 1}$$

$k (=1/a_0)$: ganancia estática. Determina la respuesta estática

$\tau (=a_1/a_0)$: constante de tiempo

Respuesta a una entrada en salto

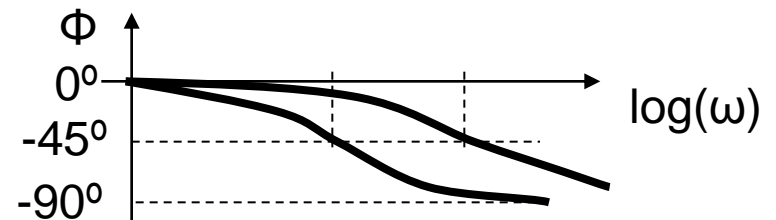
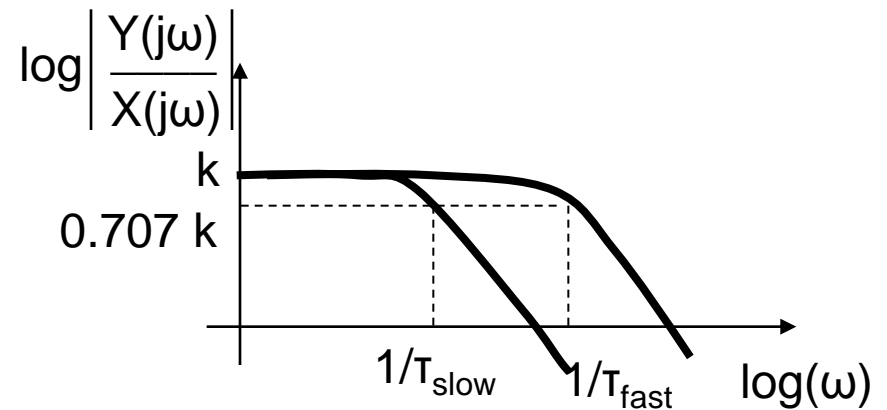


Tiempo de respuesta 98%: $t_{98} = -\tau \cdot \ln(1 - 0.98)$

Tiempo de subida 10-90%: $t_{10-90} = \tau \cdot \ln[(1 - 0.1)/(1 - 0.9)]$

Diagrama de Bode

$$\omega_c = 1/\tau$$



SISTEMAS DE PRIMER ORDEN

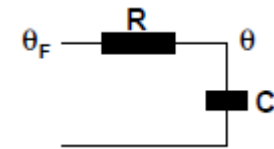
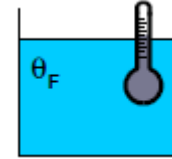
Ejemplo: termómetro de mercurio inmerso en un fluido

T_F : temperatura del fluido (magnitud de entrada)

T_T : temperatura del termómetro (magnitud de salida)

C: capacidad térmica del mercurio

R: resistencia térmica del vidrio a la transferencia de calor



El circuito equivalente es una red RC

Variación de la temperatura del termómetro es debida al flujo de calor a través del vidrio

$$\frac{d T_T(t)}{d t} = \frac{T_F(t) - T_T(t)}{RC}$$

Transformada de Laplace

$$s T_T(s) = \frac{T_F(s) - T_T(s)}{RC} \Rightarrow \frac{T_T(s)}{T_F(s)} = \frac{1}{1 + RCs}$$

SISTEMAS DE SEGUNDO ORDEN

La entrada y la salida están relacionadas por una ecuación diferencial de segundo orden

$$a_2 \frac{d^2y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y(t) = x(t) \quad \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{a_2 s^2 + a_1 s + a_0} = \frac{k\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

$k (=1/a_0)$: ganancia estática. Determina la respuesta estática

$\zeta (=a_1/2\sqrt{a_0 a_2})$: coeficiente de amortiguamiento

$\omega_n (= \sqrt{a_0/a_2})$: frecuencia natural.

Tipos de respuesta:

Críticamente amortiguado $\zeta = 1$

Sobreamortiguado $\zeta > 1$

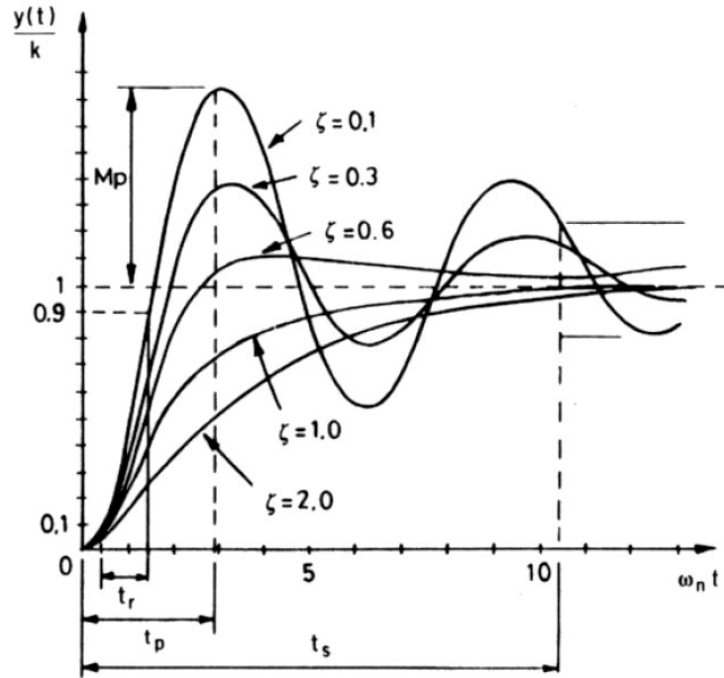
Subamortiguado $\zeta < 1$

$0 < \zeta < \sqrt{2}/2$ Existe frecuencia de resonancia ω_r

$$\omega_r = \omega_n(1 - 2\zeta^2)^{1/2}$$

SISTEMAS DE SEGUNDO ORDEN

Respuesta a una entrada en salto



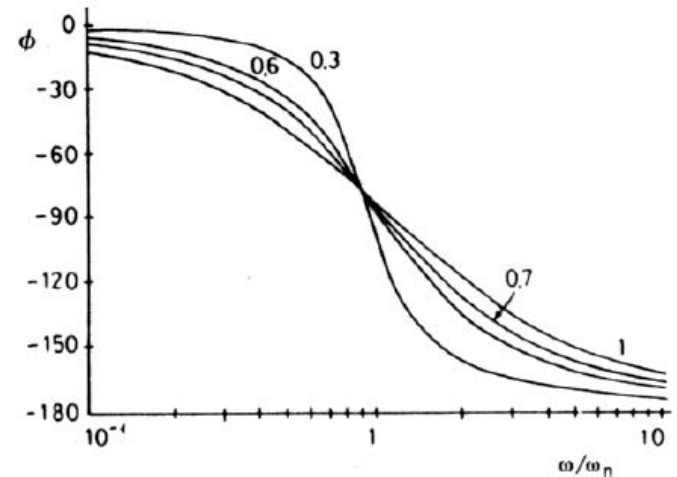
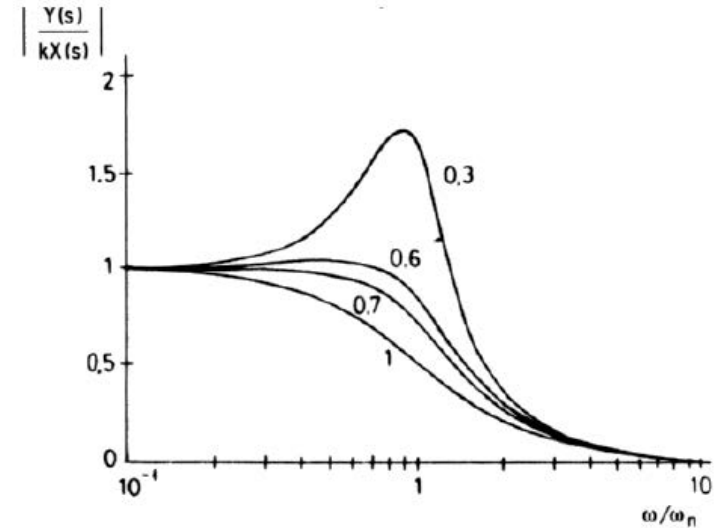
t_r : tiempo de subida

M_p : Sobrepico.

t_p : tiempo de pico

t_s : tiempo de establecimiento

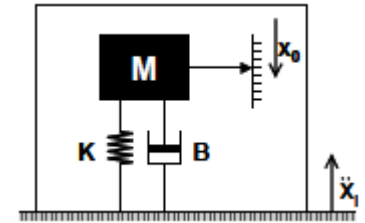
Diagrama de Bode



SISTEMAS DE SEGUNDO ORDEN

Ejemplo: termómetro con protección (añade otra resistencia térmica y capacidad calorífica al circuito dando lugar a un sistema de segundo orden sobreamortiguado)

Ejemplo: acelerómetro muelle-masa con amortiguamiento.



X_o : desplazamiento de la masa M respecto a la armadura (magnitud de salida)

a : aceleración externa (magnitud de entrada)

X_i : posición de la masa M respecto a una referencia externa $\left(a = \frac{d^2 X_i(t)}{d t^2} \right)$

M : masa

K : constante de recuperación del muelle.

B : constante de amortiguamiento proporcional a la velocidad

$$M \left(\frac{d^2 X_i(t)}{d t^2} - \frac{d^2 X_o(t)}{d t^2} \right) = K X_o + B \frac{d X_o(t)}{d t}$$

Transformada de Laplace

$$M s^2 (X_i(s) - X_o(s)) = K X_o(s) + B s X_o(s) \Rightarrow \frac{X_o(s)}{s^2 X_i(s)} = \frac{M}{K s^2 + s(B/M) + K/M}$$

3.2.3 CARACTERÍSTICAS AMBIENTALES (*environmental factors*)

Describen el comportamiento del equipo tras ser expuesto o durante la exposición a determinadas condiciones ambientales externas. Estas variables no se refieren a la magnitud que mide el sensor.

Nonoperating environmental effects (durante el almacenamiento, transporte, montaje): indica los límites a los cuales puede someterse el sensor durante un periodo especificado de tiempo sin alterar permanentemente sus prestaciones cuando vuelva a condiciones normales de funcionamiento.

Operating environmental effects: efectos durante la realización de medidas

Efecto de la Temperatura. Debe ser considerado y conocido.

- Rango de temperatura de almacenamiento (storage temperature).
- Rango de temperatura de funcionamiento (operating temperature range) con desviación de las características inferior a un determinado porcentaje o en que son aplicables los valores especificados de derivas térmicas sobre la sensibilidad (*thermal sensitivity shift*) y sobre el offset (*thermal zero shift*). También puede afectar al amortiguamiento en sistemas viscosos.

Otros factores ambientales como la humedad o la presión ambiental pueden ser relevantes en sensores inmersos en líquidos o en vacío.

Los efectos de la aceleración (en diferentes ejes) y vibración pueden ser relevantes en sistemas mecánicos o móviles (ej. vehículos).

3.3 FIABILIDAD (*reliability characteristics*)

Hace referencia a la capacidad para realizar una función bajo determinadas condiciones durante un tiempo establecido. Normalmente se determina como una probabilidad de fallo en un periodo de tiempo o número de usos.

- Vida de almacenamiento (*storage life*): tiempo en el cual el sistema puede estar almacenado en determinadas condiciones sin que cambie sus prestaciones dentro de cierta tolerancia.
- Vida de funcionamiento (*operating life*): mínima cantidad de tiempo en la que el sistema debe funcionar de forma continua o en ciclos on-off sin cambiar sus prestaciones dentro de cierta tolerancia.
- Ciclos de vida (*cycling life*): número de excursiones de rango completo en las que el sistema debe funcionar sin cambiar sus prestaciones dentro de cierta tolerancia.
- Estabilidad (*short- and long-term stabilities*): son cambios en las prestaciones del sensor en minutos, horas, días o años.
 - La estabilidad a corto plazo puede ser descrita como ruido de muy baja frecuencia. La salida puede aumentar o disminuir.
 - La estabilidad a largo plazo suele estar relacionada con el envejecimiento de los materiales (principalmente orgánicos). Es un cambio irreversible y unidireccional.

4. PRINCIPIOS FÍSICOS DE TRANSDUCCIÓN

Efectos o fenómenos de conversión de distintas formas de energía [Ref. Silicon Sensors]

in \ out	RADIANT	MECHANICAL	THERMAL	ELECTRICAL	MAGNETIC	CHEMICAL
RADIANT	<i>Photo-luminescence</i>	<i>Radiation pressure</i>	<i>Radiation heating (sun)</i>	<i>Photo-conductivity</i>	<i>Photomagnetism</i>	<i>Photochemical reaction</i>
MECHANICAL	<i>Photoelastic effect</i>	<i>Conservation of momentum</i>	<i>Friction heat</i>	<i>Piezoelectric effect</i>	<i>Magnetostriction</i>	<i>Pressure induced reaction</i>
THERMAL	<i>Incandescence</i>	<i>Thermal expansion</i>	<i>Heat conductivity</i>	<i>Seebeck effect</i>	<i>Curie-Weiss law</i>	<i>Endothermic reaction</i>
ELECTRICAL	<i>Electro-luminescence</i>	<i>Piezoelectric effect</i>	<i>Peltier effect</i>	<i>P-n junction</i>	<i>Ampere's law</i>	<i>Electrolysis</i>
MAGNETIC	<i>Faraday effect</i>	<i>Magnetostriction</i>	<i>Ettling-hausen effect</i>	<i>Hall effect</i>	<i>Magnetic induction</i>	
CHEMICAL	<i>Chemo-luminescence</i>	<i>Explosive reaction</i>	<i>Exothermic reaction</i>	<i>Volta effect</i>		<i>Chemical reaction</i>

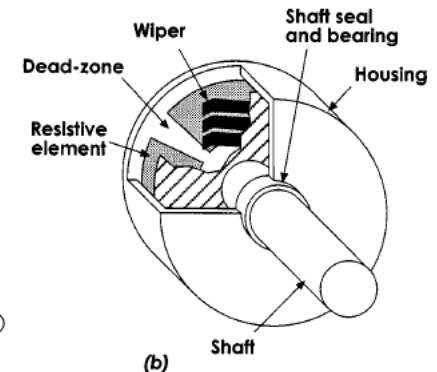
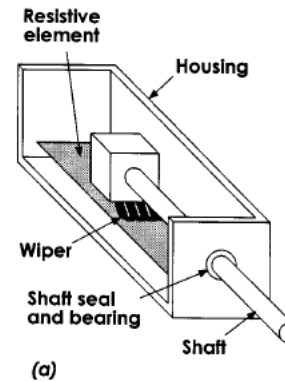
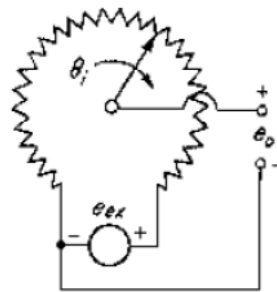
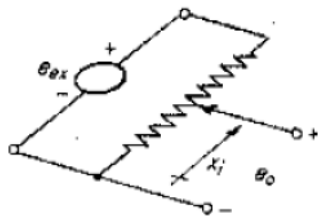
POTENCIOMETROS RESISTIVOS

Fundamento físico:

Resistencia con dos terminales fijos y un contacto móvil deslizante o giratorio

$$R_i = \rho \frac{l_i}{S} = R_o \frac{l_i}{L} = R_o x_i$$

Geometría: lineal, angular o helicoidal

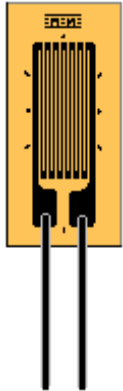


Materiales: hilo metálico bobinado, cermet (cerámica metálica), plásticos conductores

SENSORES PIEZORRESISTIVOS

Fundamento físico

Efecto piezorresistivo: variación de la resistencia eléctrica con la deformación mecánica



$$R = R_0 \left(1 + G \frac{dL}{L} \right)$$

Especificaciones:

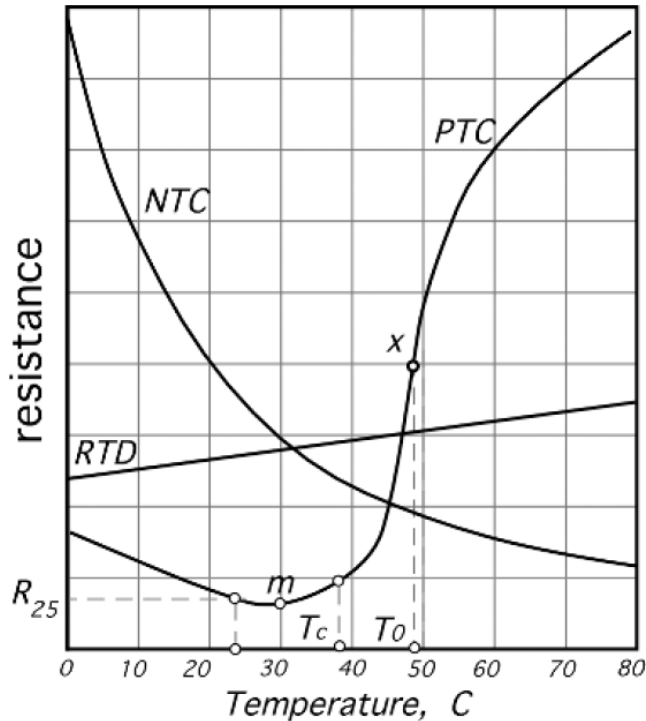
- Resistencia nominal R_0 (~100Ω metálicas, KΩ semiconductores)
- Factor de la galga G
- Deformación máxima (~10⁴ με metales, 10³ με en semiconductores)

	Material	Composition (%)	Gage factor	Temperature coefficient of resistivity (°C ⁻¹ × 10 ⁻⁵)
Metales y aleaciones	Constantan (advance)	Ni ₄₅ , Cu ₅₅	2.1	±2
	Isoelastic	Ni ₃₆ , Cr ₈ (Mn, Si, Mo) ₄	3.52 to 3.6	+17
	Karma	Fe ₅₂ Ni ₇₄ , Cr ₂₀ , Fe ₃ Cu ₃	2.1	+2
	Manganin	Cu ₈₄ , Mn ₁₂ , Ni ₄	0.3 to 0.47	±2
	Alloy 479	Pt ₉₂ , W ₈	3.6 to 4.4	+24
	Nickel	Pure	-12 to -20	670
Semiconductores	Nichrome V	Ni ₈₀ , Cr ₂₀	2.1 to 2.63	10
	Silicon	(p type)	100 to 170	70 to 700
	Silicon	(n type)	-100 to -140	70 to 700
	Germanium	(p type)	102	
	Germanium	(n type)	-150	

SENSORES TERMORRESISTIVOS

Fundamento físico:

Cambio en la resistencia eléctrica de ciertos metales y semiconductores



RTD: Resistive Temperature Detectors

metálicos: comportamiento lineal

$$\alpha = +0.0039 \text{ (Platino)}$$

NTC: Negative Temperature Coefficient

óxidos metálicos semiconductores: no lineal

$$\alpha \sim -0.03 \text{ a } -0.05$$

PTC: Positive Temperature Coefficient

titanato de bario y estrónicio: brusca conmutación

$$\alpha \sim +0.1 \text{ a } +0.6$$

* Autocalentamiento:

$$I^2 R_T = \delta \Delta T$$

I: intensidad de corriente

R_T : resistencia eléctrica

δ : coeficiente de disipación térmica

ΔT : autocalentamiento

SENSORES CAPACITIVOS

Fundamento físico

Capacidad variable de conductores separados por un dieléctrico o el vacío.

$$C = \frac{Q}{\Delta V}$$

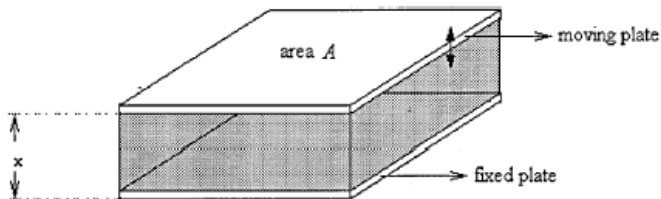
C: capacidad

Q: carga

ΔV : diferencia de potencial entre placas

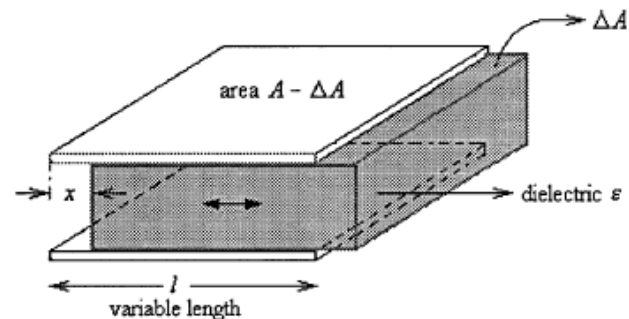
SEPARACIÓN VARIABLE

$$C(x) = \epsilon A / x = \epsilon_r \epsilon_0 A / x$$



DIELECTRICO VARIABLE

$$C = \epsilon_0 w \left[\epsilon_2 l - (\epsilon_2 - \epsilon_1) x \right]$$



Gran sensibilidad: posibilidad de detectar variaciones muy pequeñas

SENSORES INDUCTIVOS

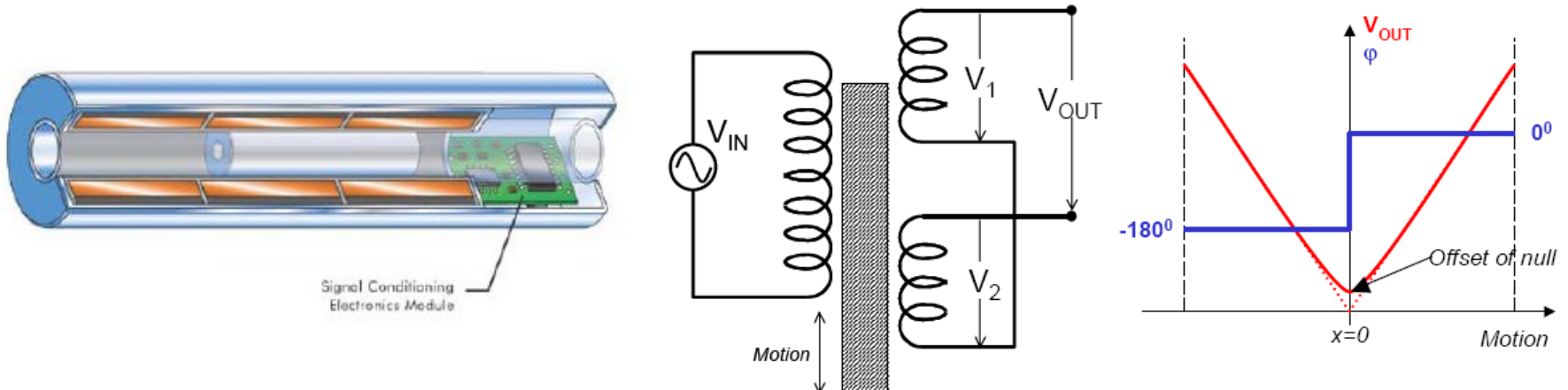
Fundamento físico

Cambio en la autoinductancia de una bobina o en el acoplamiento magnético entre varias bobinas.

INDUCCIÓN VARIABLE



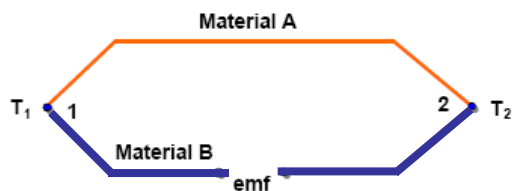
TRANSFORMADORES: LVDT (Linear Variable Differential Transformer)



SENSORES TERMOELÉCTRICOS

Fundamento físico:

Efecto Seebeck Diferencia de potencial creada cuando existe una diferencia de temperatura entre las uniones de dos materiales distintos



$$V = \alpha (T_1 - T_2) + \gamma (T_1^2 - T_2^2)$$

V: diferencia de potencial

α y γ : constantes para cada par de materiales A, B

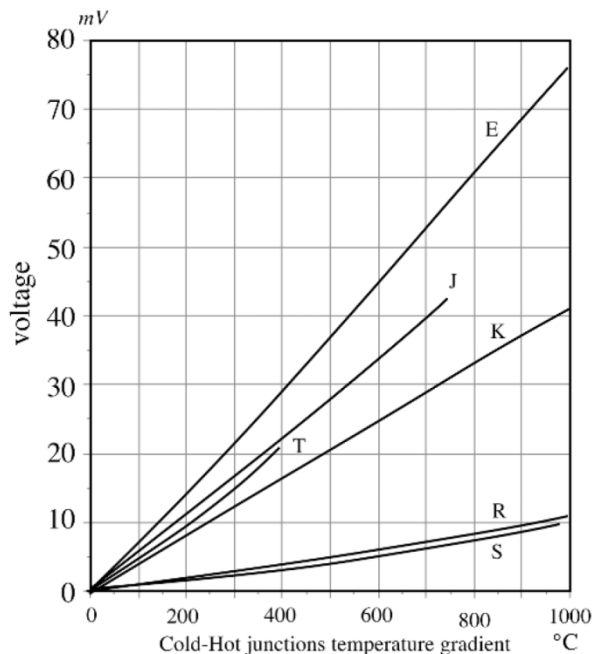
T_1 y T_2 : temperatura de las uniones

Termopar

$$S = dV/dT_1 = \alpha + 2 \gamma T_1 \sim \alpha$$

S : coeficiente Seebeck

La relación V- T_1 normalmente se expresa en forma tabular para $T_2 = 0^\circ\text{C}$



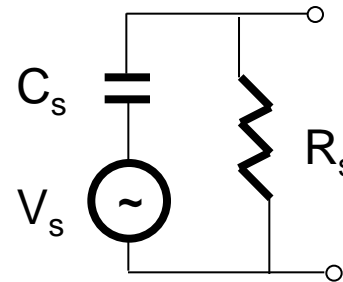
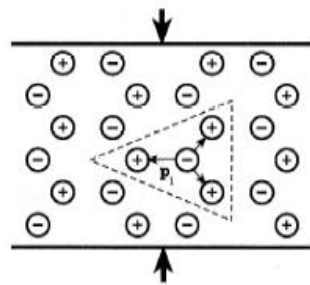
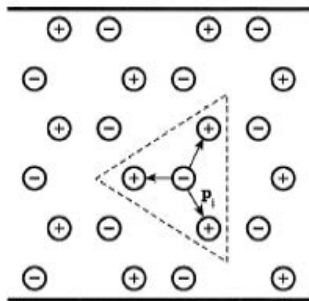
Junction Materials	Sensitivity (at 25°C) ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$)	Temperature Range ($^\circ\text{C}$)	Applications	Designation
Copper/constantan	40.9	-270 to 600	Oxidation, reducing, inert, vacuum; preferred below 0°C; moisture resistant	T
Iron/constantan	51.7	-270 to 1000	Reducing and inert atmosphere; avoid oxidation and moisture	J
Chromel/alumel	40.6	-270 to 1300	Oxidation and inert atmospheres	K
Chromel/constantan	60.9	-200 to 1000	Oxidation and inert atmospheres; avoid reducing atmosphere and metallic vapors	E
Pt (10%)/Rh-Pt	6.0	0 to 1550	Oxidation and inert atmospheres; avoid reducing atmosphere and metallic vapors	S
Pt (13%)/Rh-Pt	6.0	0 to 1600	Oxidation and inert atmospheres; avoid reducing atmosphere and metallic vapors	R
Silver-Paladium	10.0	200 to 600		
Constantan-tungsten	42.1	0 to 800		
Silicon-aluminum	446	-40 to 150	Used in thermopiles and micromachined sensors	

SENSORES PIEZOELÉCTRICOS

Fundamento físico: efecto piezoeléctrico

Generación de carga eléctrica en un material cristalino por la aplicación de una tensión mecánica. Efecto reversible

Aplicación para la medida de fuerza y aceleración. Sensores de ultrasonidos



$$V = d [F/A] S$$

d : coef. piezoeléctrico

	PVDF	BaTiO ₃	PZT	Quartz	TGS
Density ($\times 10^3$ kg/m ³)	1.78	5.7	7.5	2.65	1.69
Dielectric constant, ϵ_r	12	1700	1200	4.5	45
Elastic modulus (10^{10} N/m)	0.3	11	8.3	7.7	3
Piezoelectric constant (pC/N)	$d_{31} = 20$ $d_{32} = 2$ $d_{33} = -30$	78	110	2.3	25
Pyroelectric constant (10^{-4} C/m ² K)	4	20	27	—	30
Electromechanical coupling constant (%)	11	21	30	10	—
Acoustic impedance (10^6 kg/m ² s)	2.3	25	25	14.3	—

SENSORES PIROELÉCTRICOS

Efecto piroeléctrico: Aparición de cargas superficiales en una dirección determinada cuando un material piroeléctrico experimenta un cambio de temperatura.

$$\Delta \vec{P} = \vec{p} \Delta T$$

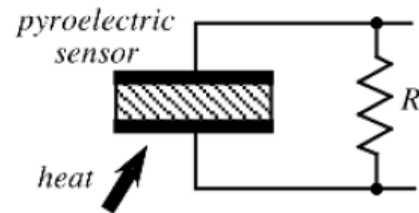
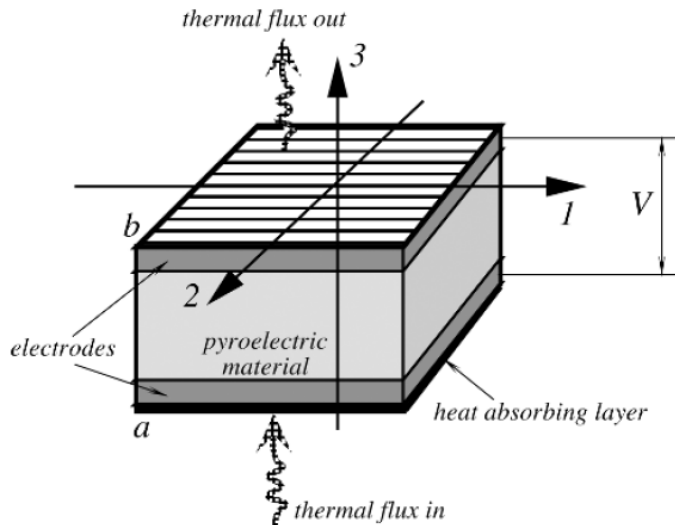
P: vector polarización

p: coeficientes piroeléctricos

T: temperatura

-El cambio en la temperatura puede causar alargamiento o acortamiento de los dipolos individuales (piezoelectricidad primaria)

-La expansión térmica puede generar deformaciones y como resultado del efecto piezoelectrico aparece polarización (piezoelectricidad secundaria)



DETECTORES FOTOELÉCTRICOS

FOTOMULTIPLICADORES

Efecto fotoeléctrico

Generación de portadores libres cuando incide un fotón de suficiente energía para arrancar electrones de la superficie de un conductor

$$h\nu = \phi + K_m$$

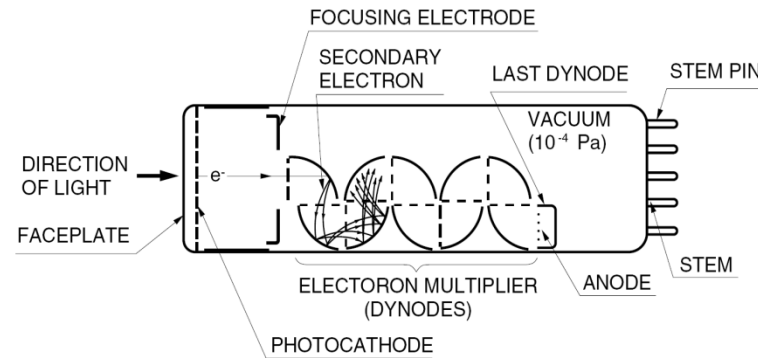
$h\nu$: energía del fotón

h : constante de Planck ($4,135 \times 10^{-15}$ eV.s)

ν : frecuencia de la luz

ϕ : función trabajo de la superficie emisora

K_m : energía cinética máxima del electrón



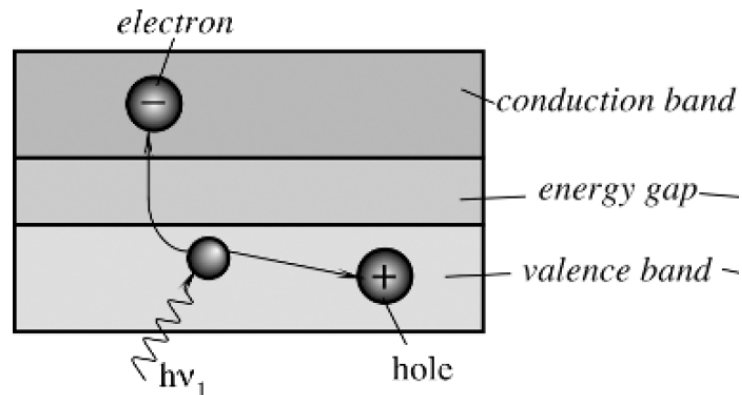
FOTODETECTORES DE SEMICONDUCTOR

Portadores excitados de la banda de valencia a la de conducción permanecen en el semiconductor

$$h\nu > E_g$$

E_g : energía del gap

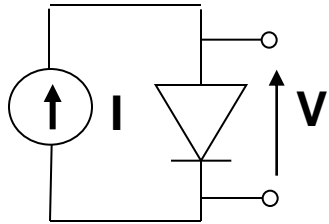
$$\lambda_{\max} = \frac{h.c}{E_g} = \frac{1,24}{E_g (eV)} \mu m$$



TERMÓMETROS DE DIODO DE UNIÓN P-N

Fundamento físico:

La tensión entre los terminales de un diodo alimentado con corriente constante varía linealmente con la temperatura.



$$I = I_0 \exp (qV / 2k_B T)$$

I: corriente que circula por el diodo

I_0 : corriente de saturación $I_0 = k \cdot \exp (-E_g / 2k_B T)$

E_g : energía del gap del semiconductor

k_B : cte de Boltzmann

V: tensión entre los extremos del diodo

$$V = E_g / q - 2k_B T / q (\ln k - \ln I)$$

$$dV / dT = - 2k_B / q (\ln k - \ln I)$$

Si, 1 mA -2.0 mV/°C

Si, 10 μ A -2.8 mV/°C

Ge, 1mA -1.95 mV/°C